



بررسی چقرمگی شکست مواد پلیمری ترد در بارگذاری مرکب کششی - برشی

محمد رضا محمد علیها، مجید رضا آیت الهی*

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۱۶۸۴۶/۱۳۱۱۴

دریافت: ۸۶/۲/۱۱، پذیرش: ۸۶/۱۲/۲۷

چکیده

بروز شکست مکانیکی در مواد پلیمری ترد از عمده نقاط ضعف آنهاست. معمولاً بروز شکست در این پلیمرها بر اثر اعمال بارگذاری ترکیبی کششی - برشی به وقوع می پیوندد. با وجود این، نتایج حاصل از آزمایش های شکست انجام شده روی چند نمونه رزین پلیمری، که معمولاً به عنوان پرکننده دندان استفاده می شوند، با معیارهای نظری موجود قابل پیش بینی نیست. در این مقاله، از یک معیار اصلاح شده برای تخمین بار شکست رزین های یاد شده استفاده شده است. نشان داده شده که معیار اصلاح شده می تواند به سبب در نظر گرفتن دقیق تر توزیع تنش روی مرز ناحیه ترک مویی در نوک ترک تخمین مناسب تری از استحکام این پلیمرها در برابر شکست ترد ارائه کند.

واژه های کلیدی

پلیمرهای ترد،
رزین پرکننده دندان،
ترک، چقرمگی شکست،
بارگذاری مرکب

* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

m.ayat@iust.ac.ir

Fracture Toughness Evaluation for Brittle Polymers under Combined Tensile-shear Loading

M.R.M. Aliha and M.R. Ayatollahi*

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology,

P.O. Box: 16846/13114, Tehran, Iran

Received 1May 2007; accepted 17 March 2008

Abstract

Fast fracture is one of the major failure modes in brittle polymers. Generally, crack growth in these polymers may occur under combined tensile-shear loading. However, the fracture test data reported previously for some dental restorative resins can not be predicted by using the available fracture criteria. In this paper, a modified fracture criterion is used for estimating the fracture load for the mentioned resin samples. It is shown that by considering a more accurate description for the crack tip stresses and also by accounting for the craze zone effects in front of the crack tip, the modified criterion presents significantly better predictions for the fracture resistance in such brittle polymers.

Key Words

brittle polymers,
dental restorative resine,
crack, fracture toughness,
combined loading

(* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: m.ayat@iust.ac.ir

مقدمه

واماندگی مکانیکی پلیمرها به طور عمده به دو شکل تسلیم برشی و ترک برداری مویی (crazing) به وقوع می پیوندد. در حالی که واماندگی نوع اول پس از تغییر شکل های برشی پلاستیک زیاد و نیز اتلاف انرژی قابل ملاحظه انجام می پذیرد، ساز و کار ترک برداری مویی اغلب به عنوان پیش درآمد شکست ترد در پلیمرها شناخته می شود. چنان چه شرایط بارگذاری روی ماده پلیمری به گونه ای باشد که بیشینه تنش اصلی به حالت فشاری باشد، هر دو گروه پلیمرهای گرماسخت و گرمانرم و از جمله پلیمرهای شیشه ای بی شکل در اثر ساز و کار تسلیم برشی یا shear band دچار تغییر شکل های پلاستیک می شوند. اما، اگر بیشینه تنش اصلی به حالت کششی باشد، ساز و کار تغییر شکل غیرکشسان و در نهایت واماندگی پلیمر، عمدتاً از نوع ترک برداری مویی است [۱،۲]. چنان چه قطعه پلیمری دارای یک ترک نیز باشد به علت تمرکز شدید تنش احتمال ایجاد این ساز و کارها در اطراف نوک ترک، افزایش می یابد.

از سوی دیگر و از جنبه کاربردی، پلیمرها به علت خواص ویژه و منحصر به فردی که دارند در بسیاری از صنایع و محصولات استفاده می شوند. مثلاً امروزه به عنوان یکی از کاربردهای تخصصی پلیمرها، از برخی از رزین ها به عنوان مواد پرکننده دندان در دندانپزشکی استفاده می شود [۳-۶]. این رزین ها به سبب وزن کم و سازگاری با محیط های دهانی عملکرد طولانی تر و مناسب تری نسبت به پرکننده های سرامیکی و فلزی دارند و از این رو رفته رفته به عنوان جایگزینی مناسب برای این پرکننده ها شناخته می شوند.

از آن جا که این مواد در دندان های پرتنش (دندان های آسیاب) نیز استفاده می شود، بنابراین لازم است که رزین های یاد شده در برابر بارهای اعمالی به هنگام عمل جویدن، تمرکز تنش های موضعی، بارهای خستگی، خوردگی و غیره مقاومت مناسبی داشته باشند. این رزین ها مانند سرامیک ها مواد تردی هستند و در نتیجه یکی از علل اصلی واماندگی آنها ایجاد شکست ترد و رشد ناگهانی ترک است. به دلیل وجود اشکال در حین فرایند تولید، ممکن است ترک های ریزی در داخل این پرکننده ها به وجود آید که در چنین مواردی آنها در اثر اعمال بار، مستعد شکست ترد می شوند. از این رو، تعیین استحکام شکست این گونه رزین ها مهم است. پدیده رشد ترک در این نوع پلیمرها از دو جنبه ریزساختاری و ماکروسکوپی (مکانیک شکست) قابل بررسی است. برای ساز و کارهای رشد ترک در پلیمرها در بخش بعدی توضیح بیشتری ارائه می شود.

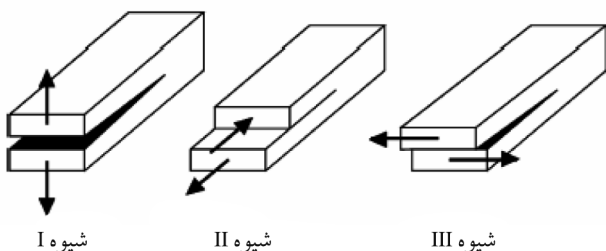
از دیدگاه مکانیک شکست برای پیش بینی شکست در پلیمرهای ترک دار کافی است، مقدار چقرمگی شکست ماده پلیمری معین گردد و

سپس با مقایسه این مقدار با شرایط شدت تنش موجود در نوک ترک، برای شکست قطعه پلیمری اظهار نظر شود. به طور کلی، ترک در یک قطعه ترک دار می تواند به سه حالت تغییر شکل یابد: شیوه I (شیوه باز شدن لبه های ترک)، شیوه II (شیوه برش یا لغزش داخل صفحه ای لبه های ترک) و شیوه III (شیوه پارگی یا لغزش خارج صفحه ای لبه های ترک). شکل ۱ نمایی از این شیوه ها را نشان می دهد.

تاکنون عمده پژوهش های نظری و تجربی انجام شده برای تعیین چقرمگی شکست رزین های پرکننده دندان، برای حالت بارگذاری شیوه I انجام شده است. به عنوان مثال، در مرجع [۷] و نیز کار پژوهشی لوید و آدامسون [۸] از قطعه تیر ترک دار زیر بارگذاری خمشی سه نقطه ای برای تعیین چقرمگی شکست شیوه I (K_{Ic}) برخی از رزین های پرکننده دندانی استفاده شده است. همچنین، قطعاتی چون قطعه کششی فشرده (compact tension, CT) [۹]، قطعه میله ای کوتاه با شکاف V شکل (short rod with chevron notch) [۱۰] و روش ایجاد تورفتگی (indentation method) [۱۱] نیز برای محاسبه چقرمگی شکست شیوه I این رزین ها به کار گرفته شده اند.

با وجود این در عمل و در شرایط کاری، این رزین ها به ندرت در معرض شیوه I خالص قرار داشته و در اکثر موارد به واسطه حالت تنش پیچیده ای، که مثلاً در هنگام عمل جویدن ایجاد می شود، ترکیبی از شیوه I و شیوه II بارگذاری (بارگذاری شیوه ترکیبی I/II) به ماده پرکننده اعمال می شود. بنابراین، تعیین میزان چقرمگی شکست رزین ها در حالت بارگذاری شیوه ترکیبی I/II از جنبه عملی و کاربردی با اهمیت است. برای بررسی تجربی چقرمگی شکست شیوه ترکیبی، روش ها و فنون مختلفی ارائه شده است. قطعه تیر ترک دار زیر بارگذاری نامتقارن خمشی چهار نقطه ای و قطعه قرص دایره ای با ترک مرکزی و زیر بار فشاری در راستای قطر (قرص برزلی) از جمله قطعات متداول برای انجام آزمایش های چقرمگی شکست شیوه ترکیبی I/II هستند که برای تعیین چقرمگی شکست رزین ها نیز استفاده شده اند [۱۲، ۱۳].

از سوی دیگر معیارهای نظری مختلفی نیز برای بررسی رفتار شکست مواد ترد ترک دار زیر بارگذاری شیوه ترکیبی I/II ارائه شده



شکل ۱ - سه شیوه اصلی تغییر شکل در قطعات ترک دار.

رزین های دندانانی مقدار قابل توجهی است و صرف نظر کردن از آن می تواند باعث ایجاد خطا در پیش بینی مقدار بار شکست یا چقرمگی شکست شود.

در ادامه، ابتدا توضیح مختصری درباره ساز و کار شکست ترد در پلیمرها ارائه شده و پژوهش های قبلی در این زمینه مرور می شود. سپس، با استفاده از معیارها و مبانی مکانیک شکست به بررسی چقرمگی شکست رزین های یاد شده پرداخته می شود.

ساز و کار میکروسکوپی و ماکروسکوپی شکست ترد در پلیمرها

همان طور که قبلاً بیان شد، ساز و کار غالب در شکست ترد و ناگهانی پلیمرها ساز و کار ترک برداری مویی است. ترک مویی یک ناحیه بسیار کوچک در اطراف نوک ترک است که در اثر اعمال بار دچار تخریب موضعی می شود. این ناحیه از نظر ظاهری، ساختاری شبیه ترک دارد که در داخل آن تعدادی ناپیوستگی و رشته الیاف از ماده پلیمری در جهت موازی با جهت بزرگترین تنش کششی وجود دارد. مرزهای این ناحیه معمولاً عمود بر جهت بیشینه تنش اصلی شکل می گیرد [۱۶]. ترک های مویی بر خلاف ترک، تنش و بارگذاری اعمالی را تا حدودی تحمل کرده و انتقال می دهند. اما، وجود ترکیبی از حفره ها و الیاف در این ناحیه باعث ضعیف شدن آنها نسبت به قسمت های سالم ماده پلیمری می شود. در نتیجه ترک مویی یک مسیر مساعد برای رشد و گسترش ترک به وجود می آورد. از این رو، در بسیاری از پلیمرهای ترد وقتی که تنش بیشینه اصلی موجود در نوک ترک به حالت کششی باشد، شکست ترد به واسطه پاره شدن و گسیختگی ترک های مویی، شکل گیری ترک و سپس رشد آن به وجود می آید [۱۷، ۲].

در اثر اعمال بار به یک پلیمر ترد دارای ترک تیز، شرایط بحرانی و بیش از حد تنش های کششی سه محوری موجود در نوک ترک باعث می شود، ماده پلیمری که در ابتدا دارای زنجیرهای درهم پیچیده است، تغییر شکل یافته و به شکل رشته الیاف استوانه ای شکل که در امتداد عرض ترک مویی قرار می گیرند، گسترش یابد. از آن جا که این رشته الیاف تنها اجزای موجود در امتداد عرض ترک مویی هستند، بنابراین به تنهایی قسمت اصلی بار اعمالی در عرض صفحه ترک مویی را تحمل می کنند.

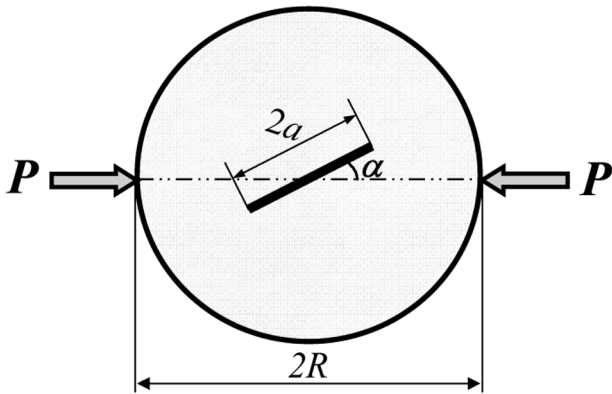
افزون بر آن، به علت سطح مقطع کاهش یافته ناحیه ترک مویی این رشته الیاف به تناسب دارای تنش های بیشتری از ماده پلیمری واقع در مجاورت ناحیه سالم و بدون ترک هستند [۱۶]. بنابراین، رشته الیاف مزبور دارای تغییر شکل های زیادی بوده و در معرض تنش های بیشتری قرار دارد. می توان چنین تجسم کرد، زنجیرهای کشیده شده الیاف پلیمر

است. معیارهای بیشینه تنش محیطی (MTS) [۱۳]، کمترین چگالی انرژی کرنشی [۱۴] و بیشترین سرعت آزادسازی انرژی [۱۵] از جمله مهم ترین معیارهای ارائه شده در این زمینه هستند. با وجود این نتایج حاصل از آزمایش های چقرمگی شکست شیوه ترکیبی I/II روی چند نمونه رزین که از آزمایش قطعه قرص برزلی به دست آمده اند، با هیچ یک از معیارهای یاد شده قابل پیش بینی نیست.

داده های حاصل از این آزمایش ها به طور قابل ملاحظه ای بیش از تخمین های نظری معیارهای یاد شده است. به عنوان مثال، در حالی که این معیارها نسبت چقرمگی شکست شیوه II به چقرمگی شکست شیوه I (K_{IIc}/K_{Ic}) را بین ۰/۹۶-۰/۶۳ پیش بینی می کنند، نتایج حاصل از آزمایش ها نشان می دهد که نسبت K_{IIc}/K_{Ic} تقریباً دو برابر این پیش بینی هاست [۶]. در نتیجه، چنین معیارهایی فاقد قابلیت و توانایی لازم برای تخمین میزان بار شکست قطعات پلیمری ترک دار آزمایش شده بوده و استفاده از آنها می تواند نتایج نادرستی را به همراه داشته باشد.

در این مقاله، معیار تعمیم یافته و اصلاح شده ای به نام معیار بیشینه تنش محیطی اصلاح شده (GMTS) برای پیش بینی بهتر و دقیق تر چقرمگی شکست شیوه ترکیبی این قبیل رزین ها استفاده شده است. در حالی که معیارهای شکست موجود که به طور مکرر توسط محققان مختلف تاکنون مورد استفاده قرار گرفته اند، هیچ یک قادر به پیش بینی نظری نتایج حاصل از آزمایش این رزین ها نیست و اختلاف میان نتایج گزارش شده برای چقرمگی شکست شیوه ترکیبی این رزین ها با معیارهای شکست موجود گاهی تا ۱۰۰ درصد است. در این کار پژوهشی نشان داده می شود که معیار شکست اصلاح شده به خوبی می تواند علت اختلاف بین نتایج تجربی گزارش شده برای چقرمگی شکست شیوه ترکیبی چند نمونه رزین پرکننده دندانانی (آزمایش شده با قطعه قرص برزلی) با معیارهای شکست موجود را توجیه و تفسیر کند. در این معیار اصلاح شده توزیع تنش اطراف نوک ترک با دقت بیشتری در نظر گرفته می شود.

بدین منظور در مقاله حاضر علاوه بر جمله های سینگولار و تکین بسط سری تنش موجود در اطراف نوک ترک (که معیارهای متداول شکست بر این اساس شکل گرفته اند) اثری که جمله غیر تکین و غیر سینگولار تنش (تنش T) در فرایند شکست، بار شکست و در نهایت چقرمگی شکست قطعه دارد، در نظر گرفته می شود، جمله تنش T به هندسه و بارگذاری قطعه آزمایش شده وابسته است. نشان داده می شود که مقدار این جمله، که عموماً در معیارهای شکست در نظر گرفته نمی شود، در قطعه قرص برزلی استفاده شده برای آزمایش شکست



شکل ۳ - قطعه قرص برزیلی با ترک مرکزی و زیر بار فشاری قطری.

روی این قطعه مورد بررسی دقیق تری قرار گیرند.

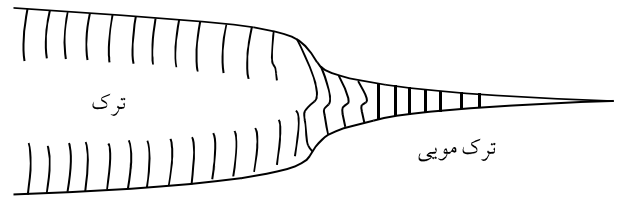
قطعه قرص دایره‌ای با ترک مرکزی و زیر بار فشاری قطری (قرص برزیلی)

در این بخش، ابتدا قطعه قرص برزیلی معرفی و بررسی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، این قطعه یک قرص دایره‌ای به شعاع R و ضخامت t است که در آن یک ترک مرکزی به طول 2a ایجاد شده است. وقتی که این قطعه زیر بارگذاری فشاری در راستای قطر قرار بگیرد، بسته به زاویه قرارگیری ترک نسبت به راستای بار فشاری اعمالی (α) و نیز طول ترک، ترکیب‌های مختلفی از شیوه I و شیوه II بارگذاری در قطعه ایجاد می‌شود. ضرایب شدت تنش شیوه I و II (K_I, K_{II}) در این قطعه از معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$K_I = \frac{P}{Rt} \sqrt{\frac{a}{\pi}} Y_I \quad (1)$$

$$K_{II} = \frac{P}{Rt} \sqrt{\frac{a}{\pi}} Y_{II} \quad (2)$$

که در آن Y_I و Y_{II} به ترتیب ضرایب هندسی شیوه I و شیوه II بارگذاری هستند. زمانی که $\alpha = 0^\circ$ است، شیوه I خالص بارگذاری در قطعه قرص برزیلی به وجود می‌آید. با افزایش زاویه α اثر شیوه II بارگذاری نیز در تنش‌های اطراف نوک ترک علاوه بر شیوه I بارگذاری ظاهر می‌شود (حالت شیوه ترکیبی I/II بارگذاری). برای هر نسبت طول ترک بدون بعد (a/R) در یک زاویه مشخص α ، حالت شیوه II خالص ایجاد می‌گردد. این زاویه برای نسبت‌های مختلف a/R بین 30° - 20° قرار دارد [۲۵].



شکل ۲ - نمایی از ترک مویی ایجاد شده در نوک ترک در یک پلیمر ترد.

به نقطه‌ای برسند که ظرفیت کشش و تغییر شکل آنها در ازای اعمال تنش کاملاً به بیشینه خود رسیده و هرگونه افزایش بار و تنش اعمالی از این مرز بحرانی موجب پارگی زنجیر پلیمری می‌شود. آن‌گاه، این بار اعمالی به زنجیرهای مجاور، منتقل و به همین ترتیب باعث پاره شدن زنجیرهای بعدی می‌شود. شکست متوالی و پیاپی الباف در ناحیه ترک مویی در حقیقت رشد ترک را به وجود می‌آورد [۱۶].

شکل ۲ نمایی از ترک مویی ایجاد شده در نوک ترک واقع در یک پلیمر بی‌شکل شیشه‌ای را نشان می‌دهد. در سال‌های گذشته محققان مختلف برای ارائه مدلی از چگونگی عملکرد ساز و کار ترک برداری مویی تلاش کرده‌اند [۱۸-۲۲] با این حال فرایند شکل‌گیری و رشد ترک مویی به ویژه در سامانه‌های متخلخل پلیمری نظیر رزین‌های کامپوزیتی تا حدود زیادی ناشناخته است.

از دیدگاه ماکروسکوپی برای بررسی استحکام و نیز مقاومت در برابر رشد ترک و شکست در موادی مانند پلیمرهای ترد از مفاهیمی چون تنش، کرنش و انرژی استفاده می‌شود. اغلب مطالعات انجام شده درباره شکست ترد پلیمرهای شیشه‌ای بی‌شکل بر مبنای قالب استاندارد مکانیک شکست کشسان خطی (linear elastic fracture mechanics, LEFM) است [۲۳، ۲۴]. در LEFM پارامتری به نام چقرمگی شکست به عنوان معیاری از استحکام شکست مواد ترد تعریف شده است که با استفاده از ضرایب شدت تنش، سرعت آزاد سازی انرژی یا انتگرال J محاسبه می‌شود. برای مثال، بنا بر LEFM هرگاه ضرایب شدت تنش موجود در نوک ترک به مقدار چقرمگی شکست ماده ترک دار (که یک خاصیت ماده به شمار می‌رود) برسد، شکست ترد اتفاق می‌افتد. مقدار چقرمگی بر حسب پارامترهای ماکروسکوپی مانند بار خارجی اعمالی به قطعه، ابعاد هندسی قطعه و خواص فیزیکی و مکانیکی ماده مورد نظر بیان شده و از روش‌های مناسب آزمایشگاهی معین می‌شود. هرچه مقدار چقرمگی شکست یک ماده بیشتر باشد، مقاومت آن در برابر رشد ترک نیز بیشتر است. چنان‌چه قبلاً نیز ذکر شد، یکی از قطعات متداول برای آزمایش شکست رزین‌ها، قطعه قرص برزیلی است. در قسمت بعد پارامترهای مهم ترک در این قطعه معرفی می‌شوند تا نتایج آزمایش‌های انجام شده

روی نمونه‌ها عمل زمان مندی در داخل محلول ۱۰ درصد اتانول و آب و در دمای ۳۷°C به مدت ۲۴ h، ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماه انجام پذیرفت [۶]. داده‌های حاصل از پژوهش‌های این مرجع [۶] نشان می‌دهد که مقدار چقرمگی شکست این رزین‌ها وابستگی کمی به زمان زمان مندی دارد. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده برای سه نوع رزین یاد شده به شکل منحنی K_{II}/K_{Ic} بر حسب K_I/K_{Ic} در شکل ۴ آمده است. نکته قابل توجه درباره این داده‌ها این است که مقدار چقرمگی شکست شیوه ترکیبی I/II به طور قابل ملاحظه‌ای، بزرگتر از مقدار پیش‌بینی شده با معیارهای نظری شکست است که قبلاً اشاره شد، نظیر معیار بیشینه تنش محیطی (MTS) [۱۳]، نتایج نشان می‌دهد که این معیارها برای تخمین میزان استحکام شکست رزین‌های آزمایش شده با قطعه قرص برزیلی مناسب نبوده و استفاده از آنها نتایج نادرستی (گاهی تا ۱۰۰ درصد خطا) به همراه دارد.

در ادامه یک معیار اصلاح شده برای پیش‌بینی بهتر و مناسب‌تر استحکام شکست در حالت بارگذاری شیوه ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به وسیله این معیار توصیف دقیق‌تری از شرایط توزیع تنش در اطراف نوک ترک در نظر گرفته می‌شود.

معیار اصلاح شده شکست

در این بخش معیار بیشینه تنش محیطی اصلاح شده (معیار GMTS) برای پیش‌بینی رفتار شکست قطعه ترک‌داری که تحت بارگذاری پیچیده I/II قرار دارد، توضیح داده می‌شود. به طور کلی، تنش محیطی $\sigma_{\theta\theta}$ در اطراف نوک ترک به شکل یک بسط مجموعه بی‌نهایت جمله نوشته می‌شود که توسط ویلیامز [۲۶] به دست آمده است:

$$\sigma_{\theta\theta}(r, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] + T \sin^2 \theta + O(r^{\frac{1}{2}}) \quad (3)$$

در بسیاری از مقاله‌ها که رفتار شکست ترد را بر مبنای تنش در حالت بارگذاری مرکب بررسی می‌کنند، از این معادله استفاده می‌شود. اما نکته حائز اهمیت درباره معادله مزبور این است که جمله اول آن به شکل جمله تکین یا سینگولار ظاهر شده و بقیه جمله‌های مرتبه بالاتراند که حالت غیرسینگولار دارند. در تمام نظریه‌های کلاسیک و متداول شکست فرض می‌شود، از میان این بی‌نهایت جمله، جمله اول این بسط تنش به سبب سینگولار بودن جمله غالب است و می‌توان از جمله‌های مرتبه بالاتر معادله تنش صرف نظر کرد. بنابراین، معیارهای شکست موجود بر همین اساس شکل گرفته‌اند. در معادله (۳)، r و θ مولفه‌های مختصات قطبی، K_I و K_{II} ضرایب شدت تنش شیوه I و II (معرف

داده‌های آزمایش‌های چقرمگی شکست چند نمونه رزین پرکننده دندانی

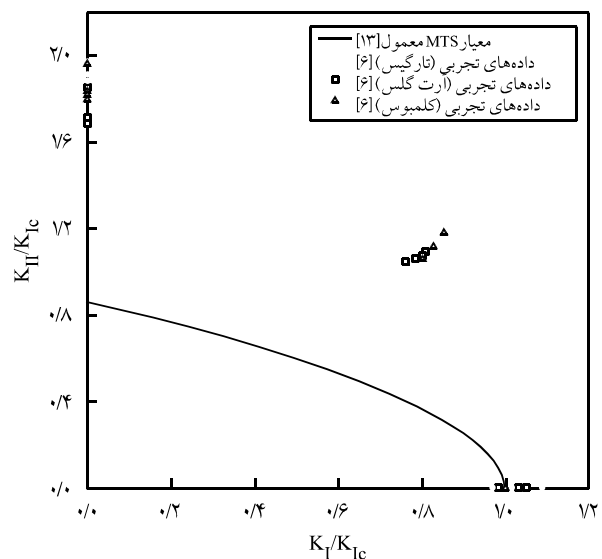
در پژوهشی که در مرجع [۶] انجام شده است، چقرمگی شکست شیوه ترکیبی I/II چند نمونه رزین پرکننده دندانی آزمایشگاهی به نام‌های تجاری کلمبوس، آرت گلس و تارگیس و با مشخصات شیمیایی زیر [۶] محاسبه شده است:

کلمبوس: مونومر بیس فنول - DMA/UDMA (با درصد وزنی ۲۳٪ به عنوان ماتریس) و ۷۷٪ وزنی از ذرات پرکننده باریم - بورسیلیکات با ابعاد $1-0.1 \mu m$.

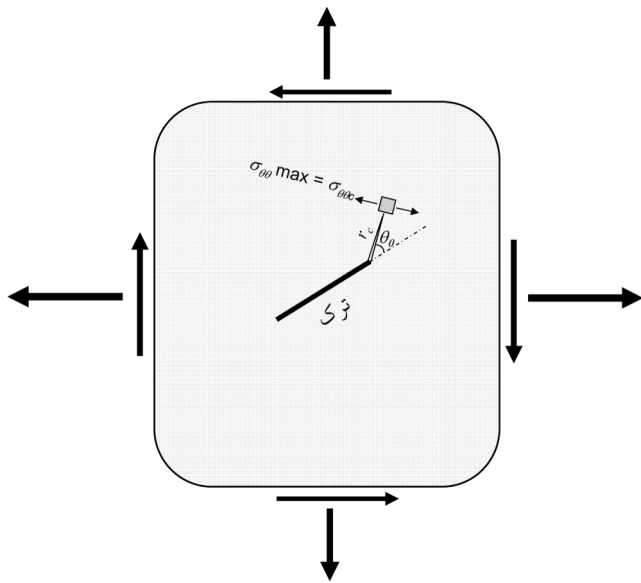
آرت گلس: پلی گلس دارای یک متاکریلیک استر چندعاملی (با درصد وزنی ۳۰٪ به عنوان ماتریس) و ۷۰٪ وزنی از ذرات پرکننده سیلیکون دیوکسید و باریم - آلومینا گلس با قطر متوسط $1 \mu m$.

تارگیس: یک سرامیک بهینه پلیمری (سرورم) دارای ۷۵-۸۵٪ وزنی از ذرات پرکننده باریم و اکسید سیلیکا (با ابعاد کوچکتر از ۱mm) در داخل ماتریسی از مونومر bisGMA/UDMA.

در این آزمایش‌ها از تعداد زیادی قطعه قرص برزیلی به شعاع $12/5 \text{ mm}$ و ضخامت 2 mm استفاده شده است. نسبت a/R در این آزمایش‌ها تقریباً برابر 0.25 است. آزمایش‌های چقرمگی شکست برای حالت $\alpha = 0^\circ$ (شیوه I خالص)، $\alpha = 14^\circ$ (شیوه ترکیبی I/II) و $\alpha = 28^\circ$ (شیوه II خالص) انجام شده است. در ضمن در پژوهش یاد شده، پیش از انجام آزمایش‌ها برای بررسی اثر محیط دهانی بر چقرمگی شکست،



شکل ۴ - نتایج داده‌های حاصل از آزمایش چقرمگی شکست شیوه ترکیبی برای چند نمونه رزین پرکننده دندان در مقایسه با نتایج معیار MTS.



شکل ۵ - وقوع شکست شیوه ترکیبی بر اساس معیار اصلاح شده شکست.

تنش محیطی اصلاح شده (GMTS) به شکل زیر خلاصه می شود:

$$K_{Ic} = \cos \frac{\theta_0}{2} [K_I \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0] + \sqrt{2\pi r_c} T \sin^2 \theta_0 \quad (8)$$

این معادله نشان می دهد که در حالت بارگذاری شیوه ترکیبی هرگاه سمت راست معادله، که وابسته به سه پارامتر شکست (T و K_{II} ، K_I) است، به مقدار چقرمگی شکست شیوه I ماده برسد، شکست ترد اتفاق می افتد. این در حالی است که در معیار متداول بیشینه تنش محیطی (MTS) [۱۳] آثار جمله غیر تکین T در نظر گرفته نشده (یا مقدار جمله T ناچیز شمرده شده و از آن صرف نظر می شود) و فرض می شود که ضرایب شدت تنش می توانند به تنهایی رفتار شکست و استحکام قطعات ترک دار را در بارگذاری شیوه ترکیبی توصیف کنند. به عبارت دیگر، معادله مربوط به معیار متداول بیشینه تنش محیطی MTS [۱۳] به شکل زیر است:

$$K_{Ic} = \cos \frac{\theta_0}{2} [K_I \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0] \quad (9)$$

اما، بر اساس پژوهش های انجام شده توسط محققان مختلف نظیر اسمیت (Smith) و همکاران [۲۷]، ثابت شده است که شکست ترد در یک شعاع بحرانی (r_c) از نوک ترک (و نه دقیقاً از نوک ترک $r=0$) شروع

جمله های تکین یا سینگولار) و T جمله ثابت و غیر تکین (جمله غیر سینگولار) تنش است. اما، در این مقاله در استخراج معیار شکست بر اساس بیشینه تنش محیطی برای پیش بینی رفتار شکست بارگذاری شیوه ترکیبی و تفسیر نتایج داده های چقرمگی شکست رزین های پرکننده دندان، اثر هم زمان جمله های سینگولار (ضرایب شدت تنش) و جمله غیر سینگولار (جمله تنش T) در نظر گرفته شده و فقط فرض می شود که جمله های مرتبه بالاتر $O(r^{3/2})$ در نزدیکی نوک ترک ناچیز و قابل صرف نظر کردن است. بدین ترتیب، توزیع تنش اطراف ترک با دقت بیشتری در نظر گرفته می شود. بر اساس معیار بیشینه تنش محیطی اصلاح شده، رشد ترک در امتداد (θ_0) اتفاق می افتد که در آن امتداد مقدار تنش محیطی ($\sigma_{\theta\theta}$) بیشترین مقدار است. شکست ترد زمانی اتفاق می افتد که مقدار $\sigma_{\theta\theta}$ در امتداد θ_0 و در یک شعاع بحرانی از نوک ترک (r_c)، به مقدار بحرانی خود ($\sigma_{\theta\theta c}$) برسد. r_c و $\sigma_{\theta\theta c}$ هر دو جزء خواص ذاتی ماده به شمار می روند. بنابراین معیار یاد شده بیان می کند که:

$$\sigma_{\theta\theta}(r_c, \theta_0) = \sigma_{\theta\theta c} \quad (4)$$

نمایی از بیان این معیار در شکل ۵ نشان داده شده است.

با توجه به معادله (۳) جهت شروع شکست (θ_0) از معادله زیر مشخص می شود:

$$\left. \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_0} = 0 \Rightarrow [K_I \sin \theta_0 + K_{II} (3 \cos \theta_0 - 1)] - \frac{16T}{3} \sqrt{2\pi r_c} \cos \theta_0 \sin \frac{\theta_0}{2} = 0 \quad (5)$$

با جای گذاری زاویه θ_0 به دست آمده از معادله (۵) در معادله (۳) معیار بیشینه تنش محیطی اصلاح شده به شکل زیر نوشته می شود:

$$\sqrt{2\pi r_c} \sigma_{\theta\theta c} = \cos \frac{\theta_0}{2} [K_I \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0] + \sqrt{2\pi r_c} T \sin^2 \theta_0 \quad (6)$$

اما برای حالت شیوه I بارگذاری ($K_{II} = 0$ ، $\theta_0 = 0$)، معادله (۶) به شکل زیر تبدیل می شود:

$$\sqrt{2\pi r_c} \sigma_{\theta\theta c} = K_{Ic} \quad (7)$$

که در آن K_{Ic} چقرمگی شکست شیوه I است که یکی از خواص ذاتی و اصلی ماده در یک قطعه ترک دار به شمار می رود. در نهایت معیار بیشینه

گرفته شده است. بار ثابت 100 N به حالت فشاری مطابق شکل در راستای قطر قرص و در زاویه‌های مختلف نسبت به راستای ترک اعمال می‌شود. مدل‌های تولید شده پس از اعمال قیود و بارگذاری مربوط، در نرم‌افزار ABAQUS [۲۸] مورد تحلیل قرار گرفته و با استفاده از روش انتگرال J [۲۸] سه پارامتر شکست K_I ، K_{II} و T برای حالت‌های مختلف شیوه ترکیبی (زاویه‌های مختلف α) محاسبه می‌شوند. در شکل ۷ تغییرات پارامترهای بدون بعد ضرایب شدت تنش Y_I و Y_{II} ارائه شده است. چنان‌چه از این شکل مشخص است، حالت $\alpha = 0^\circ$ متناظر با شیوه I خالص ($Y_{II} = 0$ یا $K_{II} = 0$) است. با افزایش زاویه α مقدار Y_I کاهش یافته و مقدار Y_{II} افزایش می‌یابد و در زاویه $\alpha \approx 28^\circ$ مقدار Y_I برابر صفر شده که نشان‌گر ایجاد حالت شیوه II خالص برای این حالت از قرص برزیلی ($a/R = 0.25$) است.

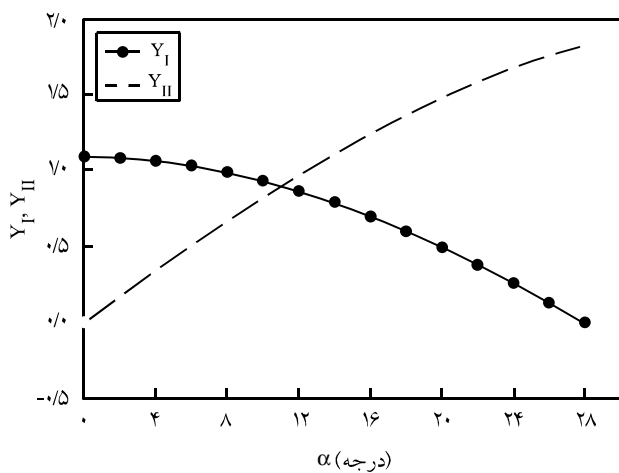
همچنین، مقدار تنش T نیز برای قطعه قرص برزیلی از معادله زیر به دست می‌آید:

$$T = \frac{P}{\pi R t (1 - a/R)} T^* \quad (10)$$

که در آن T^* شکل بدون بعد تنش T است. تغییرات T^* برای قرص برزیلی آزمایش شده ($a/R = 0.25$) برحسب زوایای مختلف α در شکل ۸ نشان داده شده است.

نتایج و بحث

معیار اصلاح شده شکست، معادله (۸)، نشان می‌دهد، برای تخمین

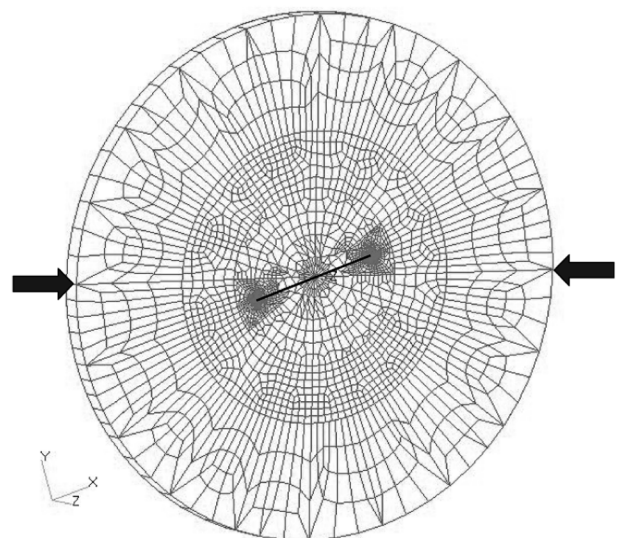


شکل ۷ - تغییرات ضرایب هندسی شیوه Y_I و Y_{II} در قطعه قرص برزیلی بر حسب زاویه ترک α برای حالت $a/R = 0.25$

می‌شود. در این فاصله، جمله‌های سینگولار معادله تنش (معادله (۳)) دیگر بی‌نهایت نبوده و در نتیجه علاوه بر K_I و K_{II} ، مقدار و علامت جمله تنش T نیز می‌تواند در استحکام شکست قطعات ترک‌داری که در معرض بارگذاری شیوه ترکیبی قرار دارند، نقش به‌سزایی داشته باشد. بر اساس نتایج ارائه شده در مقاله [۲۷]، تنش T مثبت باعث کاهش استحکام شکست می‌شود و برعکس استحکام شکست در قطعاتی که دارای تنش T منفی هستند، افزایش می‌یابد. برای استفاده از این معیار لازم است که ابتدا سه پارامتر شکست K_I ، K_{II} و T برای قطعه آزمایشگاهی مورد نظر محاسبه شود. در بخش بعد، این پارامترها برای قطعه قرص برزیلی از روش اجزای محدود معین می‌شود.

تحلیل اجزای محدود قرص برزیلی

برای محاسبه سه پارامتر شکست K_I ، K_{II} و T در قطعه قرص برزیلی، استفاده از روش اجزای محدود ابزار مناسبی است، چرا که با استفاده از این روش پارامترهای یاد شده به ازای هر طول ترک دلخواه و برای هر زاویه α (یعنی حالت‌های مختلف شیوه ترکیبی) به سادگی و با دقت قابل ملاحظه‌ای محاسبه می‌شود. بدین منظور، مدل‌های اجزای محدودی از قرص برزیلی با ابعاد و مشخصات رزین‌های آزمایش شده در مرجع [۶] ($a/R = 0.25$ و $t = 2\text{ mm}$) ایجاد شد. شکل ۶ یکی از این مدل‌ها را نشان می‌دهد. در تولید این مدل‌ها با توجه به اهمیت تنش‌ها در اطراف نوک ترک از تعداد اجزای بیشتر و ریزتری در ناحیه اطراف نوک ترک استفاده می‌شود. همچنین، برای در نظر گرفتن مناسب‌تر سینگولاریته تنش، در ردیف اول از نوک ترک اجزای سینگولار در نظر



شکل ۶ - مدل اجزای محدود قرص برزیلی.

شیوه ترکیبی در رزین های آزمایش شده می تواند به واسطه وجود این تنش منفی در قرص برزیلی باشد.

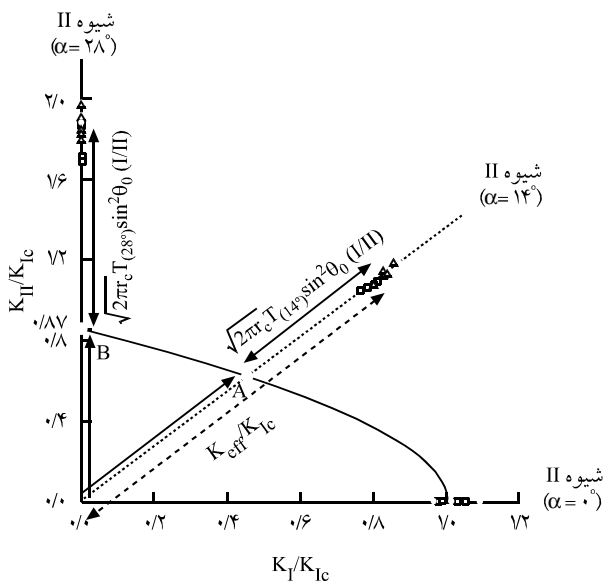
اختلاف میان معیار قدیمی شکست (MTS)، معادله (۹)، و معیار اصلاح شده شکست، معادله (۸)، در وجود جمله $\sqrt{2\pi r_c} T \sin^2 \theta_0$ است [۱۳]. بر اساس معیار اصلاح شده شکست، در نظر گرفتن این جمله باید بتواند اختلاف میان نتایج آزمایش های شکست و معیار قدیمی (اصلاح نشده) را از میان بردارد. اثر در نظر گرفتن این جمله در شکل ۹ نشان داده شده است.

در شرایط شیوه I خالص (محور افقی شکل ۹) به علت تقارن در بارگذاری، شکست درست در امتداد ترک اولیه رخ می دهد ($\theta_0 = 0$). در این حالت، اثر جمله یاد شده از بین رفته و بنابراین هر دو معیار با هم دیگر یکسان می شوند. همچنین، مشاهده می شود که در این حالت معیارها قادر به پیش بینی درست نتایج آزمایش ها هستند. اما، در شرایط شیوه ترکیبی I/II و شیوه II خالص که هیچ کدام از مقادیر θ_0 و T صفر نیستند، اثر جمله $\sqrt{2\pi r_c} T \sin^2 \theta_0$ ظاهر می شود. برای استفاده از معیار اصلاح شده در هر حالت دلخواه از شیوه ترکیبی (هر نسبت K_{II}/K_I مشخص) باید مقادیر متناظر θ_0 و T در آن حالت بارگذاری مشخص باشد. به عنوان مثال، در حالت $\alpha = 14^\circ$ که متناظر با آزمایش های انجام شده در بارگذاری ترکیبی [۶] است، مقدار جمله یاد شده از معادله $\sqrt{2\pi r_c} T_{(14^\circ)} \sin^2 \theta_{0(I/II)}$ به دست می آید. مقدار T در حالت بدون بعد خود در شکل ۸ برای کلیه حالت های شیوه ترکیبی از شیوه I خالص $\alpha = 0^\circ$ تا شیوه II خالص $\alpha = 28^\circ$ ارائه شده است. به عنوان مثال برای دو حالت $\alpha = 14^\circ$ و $\alpha = 28^\circ$ مقادیر متناظر T^* از

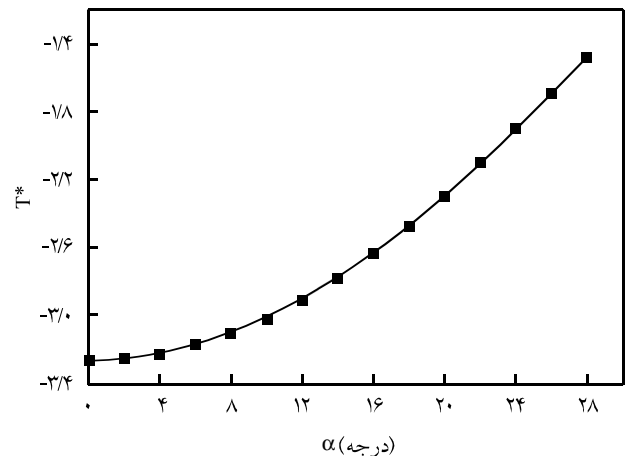
میزان استحکام شکست حالت شیوه ترکیبی باید پارامترهای K_I ، K_{II} ، T و r_c مشخص باشد. سه پارامتر اول به هندسه و بارگذاری قطعه ترک دار مورد نظر وابسته هستند. در بخش قبلی برای قطعه قرص برزیلی این پارامترها محاسبه شد. پارامتر r_c که یک فاصله بحرانی از نوک ترک است به عنوان یک ثابت و خاصیت ماده ترک دار محسوب می شود. بر اساس این معیار ناحیه ای از ماده ترک دار که داخل محدوده r_c از نوک ترک قرار دارد، به علت کرنش های بسیار زیاد دچار تخریب می شود و عملاً نقش زیادی در تحمل تنش های وارد شده ندارد. بنابراین، شکست ترد از مرز این ناحیه بسیار کوچک آغاز می شود. در نتیجه در این فاصله بحرانی از نوک ترک هر سه پارامتر K_I ، K_{II} و T می توانند نقش به سزایی در شکست ترد ایفا کنند.

این معیار اصلاح شده بر خلاف سایر معیارهای متداول موجود اثر جمله غیرتکین تنش (تنش T) اطراف نوک ترک را نیز در پیش بینی استحکام شکست ترد تحت بارگذاری مرکب در نظر می گیرد. هم چنان که ذکر شد، هرگاه سمت راست معادله (۸) که متأثر از سه پارامتر شکست K_I ، K_{II} و T است به مقدار چقرمگی شکست ماده برسد، شکست ترد اتفاق می افتد. در نتیجه، اگر مقدار تنش T در قطعه مورد نظر منفی باشد، مطابق معادله (۸) شکست در چقرمگی (K_I و K_{II}) بیشتری اتفاق می افتد و برعکس اگر مقدار تنش T مثبت باشد سهم جمله های K_I و K_{II} که نشان دهنده بار شکست قطعه هستند، کاهش یافته و شکست ترد در چقرمگی کمتری به وقوع می پیوندد.

همان طور که از شکل ۸ مشاهده می شود، مقدار تنش T در قطعه قرص برزیلی برای همه زوایا (از شیوه I خالص تا شیوه II خالص) منفی است. بنابراین، بر اساس معیار اصلاح شده، افزایش چقرمگی شکست



شکل ۹- اثر جمله تنش T در پیش بینی چقرمگی شکست شیوه ترکیبی.



شکل ۸- تغییرات شکل بدون بعد تنش T در قطعه قرص برزیلی بر حسب زاویه ترک α برای حالت $a/R = 0.25$.

رزین با استفاده از معادله های (۱۱) و (۱۲) در حدود ۰/۶۴ mm محاسبه می شود. به همین ترتیب و به طریق مشابه، مقادیر متناظر r_c برای دو رزین دیگر (کلمبوس و آرت گلس) نیز محاسبه و معین می شود که نتایج آن در جدول ۱ آمده است.

همان طور که مشاهده می شود، مقادیر r_c حاصل برای هر سه رزین به هم نزدیک بوده و همگی کوچک تر از ۱ mm هستند. در نهایت با داشتن تمام پارامترهای لازم (K_{II} , K_I , θ_0 , T , r_c) مقدار چقرمگی شکست شیوه ترکیبی رزین های دندانانی مورد نظر با استفاده از معیار اصلاح شده شکست پیش بینی نظری می شود. نحوه تعیین مقدار چقرمگی شکست رزین های یاد شده در حالت شیوه ترکیبی ($\alpha = 14^\circ$) I/II و در حالت شیوه ترکیبی ($\alpha = 28^\circ$) II در جدول ۱ ارائه شده است. چقرمگی شکست موثر با $K_{eff} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2}$ نمایش داده می شود و در آن به شکل

تعریف می شود. از این جدول و نیز شکل ۹ مشاهده می شود، معیار معمولی شکست (MTS) مقدار چقرمگی شکست موثر در حالت $\alpha = 14^\circ$ و $\alpha = 28^\circ$ را به ترتیب برابر ۰/۷۸۳ و ۰/۸۶۶ (نقاط A و B در شکل ۹) تخمین می زند که تفاوت زیادی با نتایج آزمایش ها دارد. میانگین مقدار حاصل از آزمایش این سه رزین برای حالت $\alpha = 14^\circ$ و $\alpha = 28^\circ$ به ترتیب برابر ۰/۷۳۶ و ۰/۷۷۵ است (شکل ۹). بر این اساس، اختلاف میان پیش بینی های این معیار و داده های آزمایش در دو حالت $\alpha = 14^\circ$ و $\alpha = 28^\circ$ به ترتیب بیش از ۷۵ و ۱۰۰ درصد است. با وجود این مشاهده می شود که استفاده از معیار اصلاح شده شکست (GMTS) و در نظر گرفتن یک مقدار ثابت r_c برای هر یک از رزین ها در حالت شیوه ترکیبی I/II و شیوه II تخمین های بسیار بهتر و مناسب تری از چقرمگی شکست رزین های آزمایش شده با قطعه قرص برزیلی ارائه می کند. بنابراین، از مباحث پیش گفته می توان نتیجه گرفت، علت افزایش چقرمگی شکست شیوه ترکیبی این رزین ها به طور عمده به واسطه وجود جمله تنش T منفی قابل ملاحظه در قطعه قرص برزیلی است. شایان ذکر است، بهبود قابل ملاحظه ای که در این مقاله برای تخمین نتایج

روی شکل ۸ به ترتیب برابر ۲/۶- و ۷۵۳- به دست می آید. مقدار θ_0 (زاویه شروع شکست) نیز از معادله (۵) با توجه به مشخص بودن حالت بارگذاری شیوه ترکیبی (مقدار α) و نیز پارامترهای شکست متناظر هر زاویه (K_I , K_{II} , T) در قطعه قرص برزیلی آزمایش شده محاسبه می شود. برای پیش بینی رفتار شکست در شیوه II خالص (محور عمودی شکل ۹) نیز همین رویه انجام می شود.

پارامتر دیگری که در محاسبه جمله $\sqrt{2\pi r_c T \sin^2 \theta_0}$ مورد نیاز است، r_c است. این پارامتر یک فاصله بحرانی از نوک ترک است که شکست ترد از آن فاصله شروع می شود و در مواد مختلف مهندسی مفهوم یا تعریف متفاوتی دارد. برای پلیمرهای ترد و رزین های مورد نظر در این پژوهش، این فاصله برابر طول ناحیه ترک مویی موجود در نوک ترک در نظر گرفته می شود. این ناحیه دارای طولی بسیار کم و معمولاً در حد دهم میلی متر است و از معادله زیر معین می شود [۲۹]:

$$r_c = \text{طول ترک مویی} = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ci}} \right)^2 \quad (11)$$

که در آن σ_{ci} تنش شکل گیری ناحیه ترک مویی در نوک ترک بوده و مقدار آن در حدود (۵۰٪-۴۰٪) استحکام کششی (σ_t) ماده پلیمری است [۳۰]. بنابراین، معادله مربوط به محاسبه مقدار r_c در این پلیمرها به شکل زیر خلاصه می شود:

$$r_c \approx \lambda \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right)^2 \quad \text{و} \quad \lambda = [0.5\pi \text{ to } 0.75\pi] \quad (12)$$

مقدار استحکام کششی رزین هایی، که در پرکننده های دندانانی مورد استفاده قرار می گیرند، به طور نمونه در محدوده ۵۵-۳۰ MPa قرار دارد [۳۱]. به عنوان مثال، مقدار استحکام کششی (σ_t) تارگیس که از آزمایش قطعه قرص برزیلی به دست آمده است، برابر $\sigma_t = 32 \text{ MPa}$ گزارش شده است [۳۲]. با در نظر گرفتن مقدار میانگین $K_{Ic} = 0.55 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ برای چقرمگی شکست شیوه I تارگیس [۶]، مقدار متوسط r_c برای این

جدول ۱- نحوه پیش بینی معیار اصلاح شده از چقرمگی شکست شیوه ترکیبی.

شیوه I/II ($\alpha = 28^\circ$)			شیوه I/II ($\alpha = 14^\circ$)			r_c (mm)	σ_t (MPa)	K_{Ic} (MPa $\sqrt{\text{m}}$)	T* (از شکل ۸)		a (mm)	نام رزین
(K_{IIc}/K_{Ic}) [۶] داده آزمایش	GMTS (K_{IIc}/K_{Ic})	MTS (K_{IIc}/K_{Ic})	(K_{eff}/K_{Ic}) [۶] داده آزمایش	GMTS (K_{eff}/K_{Ic})	MTS (K_{eff}/K_{Ic})				$\alpha = 28^\circ$	$\alpha = 14^\circ$		
۷۷۷	۷۶۲	۰/۸۶۶	۷۳۷۸	۷۳۶۴	۰/۷۸۳	۰/۶۴	۳۲	۰/۵۴			۳/۱۲۵	تارگیس
۷۷۹	۷۶۵	۰/۸۶۶	۷۳۹۲	۷۳۸۳	۰/۷۸۳	۰/۷۳	۲۸	۰/۶۴	-۷۵۳	-۲/۶	۳/۱۲۵	آرت گلس
۷۷۱	۷۶۰	۰/۸۶۶	۷۳۶۵	۷۳۶	۰/۷۸۳	۰/۷۰	۳۰	۰/۵۶			۳/۱۲۵	کلمبوس

استحکام شکست این نوع از رزین ها، انجام تحقیقات و مطالعات بیشتر ضروری است.

در خاتمه یادآوری این نکته مفید است که اگر چه معیار اصلاح شده GMTS در این مقاله برای بررسی نتایج آزمایشگاهی سه نمونه رزین دندانی مشخص مورد استفاده قرار گرفته است، اما دامنه کاربرد آن به سایر مواد پلیمری ترد نیز قابل تعمیم است، مشروط بر آن که ساز و کار رشد ترک در آنها از نوع شکست ترد باشد.

نتیجه گیری

- داده های آزمایشگاهی گزارش شده از چقرمگی شکست شیوه ترکیبی چند نمونه رزین پرکننده دندان به طور قابل ملاحظه ای بزرگتر از پیش بینی های معیارهای متداول شکست اند.
- نشان داده شد که معیار اصلاح شده شکست پیش بینی های دقیق تری از چقرمگی شکست نمونه های رزین آزمایش شده با قطعه قرص برزیلی ارائه می کند.
- بر اساس معیار اصلاح شده شکست، اثر جمله تنش T منفی قابل ملاحظه در قطعه قرص برزیلی و در یک فاصله بحرانی از نوک ترک (اندازه ناحیه ترک مویی)، عامل اصلی افزایش چقرمگی شکست حالت شیوه ترکیبی رزین های یاد شده است.

مراجع

1. Tjssens M.G.A., Van der Giessen E. and Sluys L.J., Modeling of Crazeing Using a Cohesive Surface Methodology, *Mech. Mater.*, **32**, 19-35, 2000.
2. Gearing B.P. and Anand L., On Modeling the Deformation and Fracture Response of Glassy Polymers due to Shear-yielding and Crazeing, *Int. J. Solid. Struct.*, **41**, 3125-3150, 2004.
3. Lina N.J., Drzalb P.L. and Lin-Gibsona S., Two-dimensional Gradient Platforms for Rapid Assessment of Dental Polymers: A Chemical, Mechanical Biological Evaluation *Dent. Mater.*, **23**, 1211-1220, 2007.
4. Garoushi S., Vallittu P.K. and Lassila L.V.J., Short Glass Semi-interpenetrating Polymer Fiber Reinforced with Restorative Composite Resin Network Matrix, *Dent. Mater.*, **23**, 1356-1362, 2007.
5. Zhao D., Botsis J. and Drummond J.L., Fracture Studies of Selected Dental Restorative Composites, *Dent. Mater.*, **13**, 198-207, 1997.
6. Scherrer S.S., Botsis J., Studer M., Pini M., Wiskott H.W.A. and Belser U., Fracture Toughness of Aged Dental Composites in Combined Mode I and Mode II Loading, *Appl. Biomater.*, **53**, 362-370, 2000.
7. Ferracane J.L., Antonio R.C. and Matsumoto H., Variables Affecting the Fracture Toughness of Dental Composites, *J Dent. Res.*, **66**, 1140-1145, 1987.
8. Lloyd C.H. and Adamson H., The Development in Fracture Toughness and Fracture Strength in Posterior Restorative Materials, *Dent. Mater.*, **3**, 225-231, 1987.
9. Kovarik R.E. and Fairhurst C.W., Effect of Griffith Precracks on Measurement of Composite Fracture Toughness, *Dent. Mater.*, **9**, 222-228, 1993.

10. Pilliar R.M., Vowels R. and Williams D.F., The Effect of Environmental Aging on the Fracture Toughness of Dental Composites, *J. Dent. Res.*, **66**, 722-726, 1987.
11. Higo Y., Damri D., Nunomura S., Kumada, K., Sawa N., Hanaoka K., Teranaka T. and Iwamoto T., The Fracture Toughness Characteristics of Three Dental Composite Resins, *Biomed. Mater. Eng.*, **1**, 223-231, 1991.
12. Araki W., Nemoto K., Adachi T. and Yamaji A., Fracture Toughness for Mixed Mode I/II of Epoxy Resin. *Acta Materialia*, **53**, 869-875, 2005.
13. Erdogan F. and Sih G.C., On The Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear, *J. Basic Eng., Transactions of ASME*, **85**, 519-525, 1963.
14. Sih G.C., Strain-energy-density Factor Applied to Mixed Mode Crack Problems, *Int. J. Fract.*, **10**, 305-321, 1974.
15. Hussain M.A., Pu S.L. and Underwood J., Strain Energy Release Rate for a Crack Under Combined Mode I and Mode II. Fracture Analysis, ASTM STP 560, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2-28, 1974.
16. Maccagno T.M. and Knott J.F., Fracture Behavior of PMMA in Mixed Modes I and II, *Eng. Fract. Mech.*, **34**, 65-86, 1989.
17. Kambour R.P., A Review of Crazeing and Fracture in Thermoplastics, *J. Polym. Sci.*, **7**, 1-154, 1973.
18. Brown H.R., A Molecular Interpretation of the Toughness of Glassy Polymers, *Macromolecules*, **24**, 2752-2756, 1991.
19. Xiao F. and Curtin W.A., Numerical Investigation of Polymer Craze Growth and Fracture, *Macromolecules*, **28**, 1654-1660, 1995.
20. Hui C.Y., Ruina A., Creton C. and Kramer E.J., Micromechanics of Crack Growth Into a Craze in a Polymer Glass, *Macromolecules*, **25**, 3948-3955, 1992.
21. Kramer E.J., Microscopic and Molecular Fundamentals of Crazeing, *Adv. Polym. Sci.*, **52-53**, 1-56, 1983.
22. Kramer E.J. and Berger L.L., Fundamental Processes of Craze Growth and Fracture, *Adv. Polym. Sci.*, **91-92**, 1-68, 1990.
23. Kinloch A.J. and Young R.J., *Fracture Behavior of Polymers*, Elsevier, London, 1983.
24. Williams J.G., *Fracture Mechanics of Polymers*, Ellis Horwood, London, 1984.
25. Atkinson C. Smelser R.E. and Sanchez J., Combined Mode Fracture Via the Cracked Brazilian Disc Test, *Int. J. Fract.*, **18**, 279-291, 1982.
26. Williams M.L., On the Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack, *J. Appl. Mech.*, **24**, 109-114, 1957.
27. Smith D.J., Ayatollahi M.R. and Pavier M.J., The Role of T-stress in Brittle Fracture for Linear Elastic Materials Under Mixed Mode Loading, *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, **24**, 137-150, 2001.
28. ABAQUS, V5.7, User's Manual, Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc, Providence, Rhode Island, 1997.
29. Tijssens M.G.A., Van der Giessen E. and Sluys L.J., Simulation of Mode I Crack Growth in Polymers by Crazeing, *Int. J. Solid. Struc.*, **37**, 7307-7327, 2000.
30. Bhattacharjee D. and Knott J.F., Effect of Mixed Mode I and II Loading on the Fracture Surface of Polymethyl Methacrylate (PMMA). *Int. J. Fract.*, **72**, 359-381, 1995.
31. Zandinejad A.A., Atai M. and Pahlevan A., The Effect of Dental Composites and Porous Fillers on the Mechanical Properties of Dental Composites, *Dent. Mater.*, **22**, 382-387, 2006.
32. Casselli D.S.M., Worschech C.C., Paulillo L.A.M.S. and Dias C.T.S., Diametral Tensile Strength of Composite Resins Submitted to Different Activation Techniques, *Braz. Oral Res.*, **20**, 214-218, 2006.